doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202502010

岩石颗粒材料压实过程的粒径分布及能量耗散研究

缪鑫宇[1],徐郑伟[2],孔海陵[1],左承祯[1]

(1.盐城工学院 土木工程学院,江苏 盐城 224051;
2.武汉地震工程研究院有限公司 湖北震泰建设工程质量检测有限责任公司,湖北 武汉 430071)

摘要:为探讨岩石颗粒材料在压实过程中的粒径分布和能量耗散,以级配岩石颗粒材料为研究对象,利用自制压实试验系统对不同级配的岩石颗粒材料试样,进行不同压实量下侧向受限的压实破碎试验。结果表明,不同配比试样的破碎度、分形维数和能量耗散均随着压实量的增大而逐渐增大;通过拟合分析试样的破碎度和能量耗散,发现二者之间具有显著的线性关系,进一步证明了试样压实量是破碎度、分形维数、能量耗散指标的主要影响因素。

关键词:岩石颗粒材料;粒径分布;破碎度;分形特征;应变能密度

中图分类号:TU45 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5322(2025)02-0071-08

岩石颗粒材料具有水稳性好、抗压强度高,压实密度大、沉降变形小等工程特点,被广泛地应用于土石坝、公路路基等建设工程中[1-3]。然而,岩石颗粒材料在受压过程中因相互挤压会导致部分颗粒破碎,使其粒径分布发生变化,从而影响材料的物理力学性能,进而影响材料在工程中的应用。

当前对岩石颗粒材料破碎程度的定义以及相关研究成果[4-9]有很多,还有不少文献[10-18]研究了颗粒破碎后粒径的分布规律。随着能量耗散理论的发展,能量耗散理论在岩石颗粒材料压实研究领域的应用越来越广泛,许多学者利用能量耗散的研究方法来描述岩体的变形破坏行为。文献[19-20]通过能量分析研究地下工程周围岩体受冲击后的状态,以及岩石试样破坏过程中的能量与围压的关系,发现岩样破裂时实际吸收的能量与破裂时所处的围压成线性关系;谢和平等[21]讨论了岩石变形破坏过程中能量耗散、能量释放与岩石强度和整体破坏间的内在联系,指出岩石变形破坏是能量耗散与能量释放的综合结果;张亮等[22]基于岩石能量耗散理论和室内试验数据,研究了单轴压缩条件下单裂隙岩石破坏过程中能量指标的演化规律。

上述研究大多集中于颗粒破碎指标和破碎后试样力学性质改变的研究,对压实过程中的粒径重新分布及能量耗散并未有太多深入的研究。本文通过对岩石颗粒材料开展不同级配下的压实实验,分析试验前后岩石颗粒材料的形态及其粒径分布,研究岩石颗粒材料的粒径再分布规律,探讨颗粒压实过程中的能量耗散规律,为岩石颗粒材料作为路基填充材料的应用提供理论基础和试验依据。

1 试验系统及过程

1.1 试验设备

本次使用的岩石颗粒材料压实试验装置,包括加载试验系统、数据采集系统和压实试验系统3个部分。其中,加载试验系统采用济南试验机厂生产的WDW-100D型微机控制的电子式万能试验机,如图1所示,可进行拉伸、压缩、剪切和弯曲等多种试验;数据采集系统主要包括位移传感器、力传感器、计算机及试验机操控软件等,可以

收稿日期:2024-10-11

基金项目:2024年盐城工学院研究生科研与实践创新计划项目(KYCX24_XY046)。

作者简介:缪鑫宇(2001—),男,江苏东台人,硕士生,主要研究方向为岩石颗粒材料。

通信作者:孔海陵(1981—),男,江苏姜堰人,教授,博士,主要研究方向为岩体渗流力学与灾变机理、粗粒土破碎与固废填充等。

根据需要进行各种材料的拉伸、压缩、弯曲等多种试验数据的采集;压实试验系统的核心是自制的压实仪,包含缸筒、空心活塞(实心活塞自重较大,为避免试样颗粒在试验前因承受较大的活塞自重而承压破坏,活塞采用了空心设计)、底板、活塞盖等,如图2所示。



图1　WDW-100D试验系统

Fig. 1　WDW-100D test system

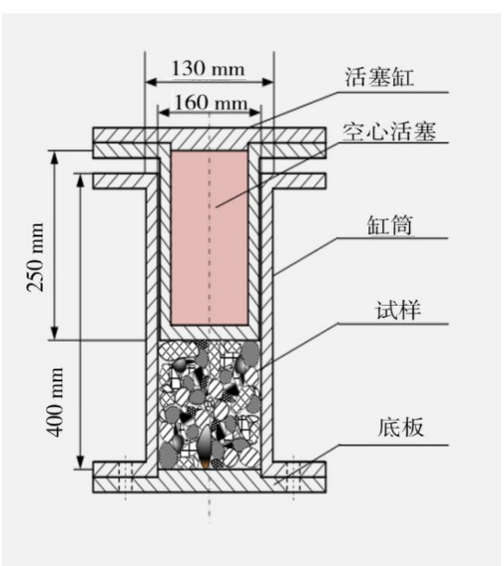


图2　压实试验系统

Fig. 2　Compaction test system

1.2　试验材料

为了更好地模拟工程应用中的实际情况,取砂性岩石颗粒材料2 000 g,并根据粒径大小将其分为[10,15)mm、[15,20)mm、[20,25)mm、[25,30]mm 4个粒径区间。试验时4种粒径区间的岩石颗粒按Talbot连续级配公式[23]进行配比,公式为

$$p(d)=\left(\frac{d}{d_{\mathrm{M}}}\right)^{n}\times 100\% \tag{1}$$

式中:$p(d)$为粒径小于d的颗粒质量分数,%;d为颗粒粒径,mm;d_{M}为颗粒的最大粒径,mm;n为Talbot幂指数。

试验时,不同Talbot指数下各粒径区间内的岩石颗粒质量分布如表1所示。

表1　不同Talbot指数下试样的粒度分布

Table 1　Particle size distribution of samples under different Talbot indices　　g

Talbot幂指数n	粒径区间/mm			
	[10,15)	[15,20)	[20,25)	[25,30]
0.7	1 231.1	274.7	254.6	239.6
0.9	1 071.8	316.7	308.8	302.7
1.1	933.0	347.3	356.2	363.4
1.3	812.3	368.4	397.3	422.0

1.3　试验方案

为研究不同压实量对岩石颗粒材料粒径分布的影响,将压实量分别设置为10 mm、20 mm、30 mm和40 mm。具体试验步骤如下:

1)对试验系统进行安装调试,保证系统正常运行。

2)采用电子秤将不同粒径的岩石颗粒材料按照相应的配比称重,每组2 000 g,共32组。

3)在缸筒内壁抹润滑油,将试样装入缸内并抹平;在空心活塞的四周贴上长度尺,以便定位岩石颗粒试样的压实量;量取缸筒内试样抹平后的高度,加上空心活塞,盖上盖板后放置在加载试验系统上。

4)根据试验方案,采用竖向匀速加载的方式对试样加载,直到压实量达到设定值时停止加载;量取试样高度并卸载、卸料,观察并记录岩石颗粒材料压实破碎后的状态;将压实后的岩石颗粒试样筛分称重,记录破碎后各粒径的质量。

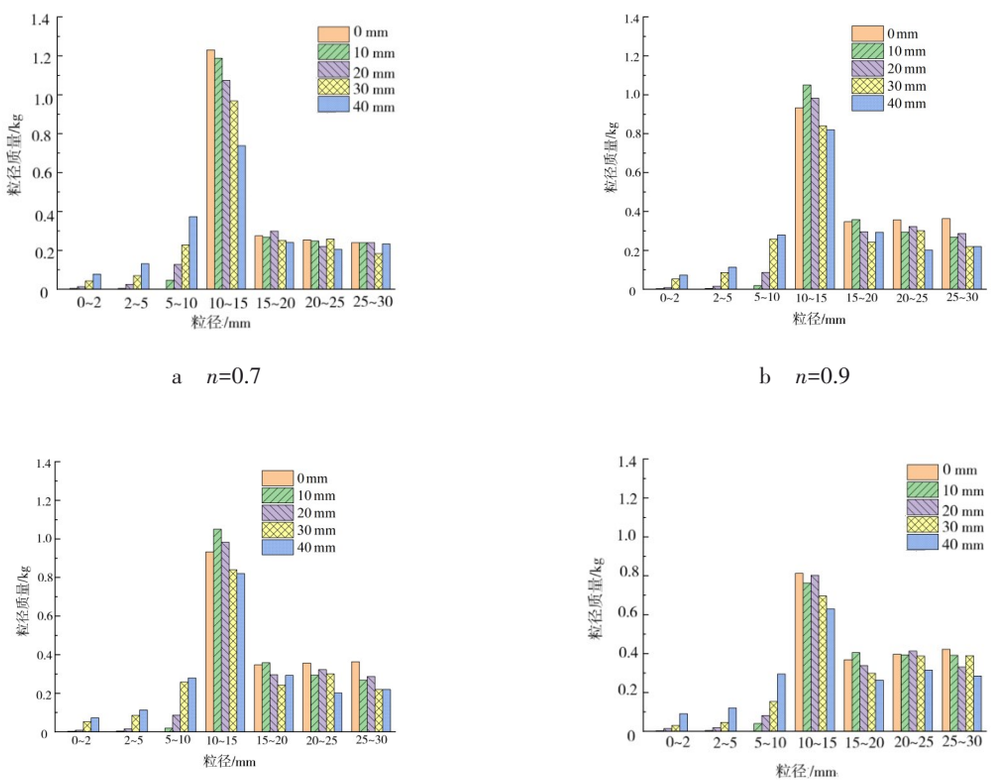
2　试验结果与分析

2.1　岩石颗粒材料压实破碎前后的粒径质量分布

压实试验结束后,称量并记录岩石颗粒破碎后粒径在(0,2]mm、(2,5]mm、(5,10]mm、(10,15]mm、(15,20]mm、(20,25]mm、(25,30]mm的

质量，得到不同Talbot指数下、不同压实量的压实试验前后各粒径的质量分布，如图3所示。

从图3中的4组试验结果可以发现，试样压实破碎产生的粒径在(0，2]mm、(2，5]mm、(5，10]mm的3种次生小粒径岩石颗粒质量随着试样压实量的增加而增加；压实破碎后粒径为(10，15]mm的颗粒在n=0.7、1.1时，随着压实度的增加而显著降低；压实破碎后粒径大于15 mm的粗粒在压实前后差别不大。另外，在压实量为10、20 mm时，试验压实破碎产生的小粒径质量极少；当压实量为30、40 mm时，破碎后产生的小粒径质量显著增加，大约是压实量为10、20 mm产生小粒径质量的5倍以上。



a　n=0.7　　b　n=0.9

c　n=1.1　　d　n=1.3

图3　不同Talbot指数下、不同压实量的压实试验前后各粒径质量分布

Fig. 3　Mass distribution of particle size before and after compaction tests with different Talbot indices and compaction amounts

图4给出了4种Talbot指数下不同压实量时颗粒质量分数的变化情况，其中横坐标为颗粒粒径d与最大粒径d_M的比值。从图4可以看出，压实破碎后粒径在(0，2]mm、(2，5]mm、(5，10]mm的次生颗粒的质量占比随着d/d_M的增大而增加，也随着压实量的增加而增大。具体地说，在图4a中，当Talbot指数为0.7、d/d_M为0.33，压实量从10 mm增加到20、30、40 mm时，次生颗粒的质量占比依次为2.78%、8.35%、16.96%、29.13%，百分比增量依次为5.57%、8.61%、12.17%，呈阶梯形的增加趋势；在图4b中，当Talbot指数为0.9、d/d_M为0.33，压实量从20 mm增加到30 mm时，次生颗粒的质量占比增量较大，从5.55%增加到19.89%，百分比增量为14.34%；在图4c中，当Talbot指数为1.1、d/d_M为0.33，压实量从30 mm增加到40 mm时，次生颗粒的质量占比依次为11.45%、29.40%，百分比增量为17.95%；在图4d中，当Talbot指数为1.3、d/d_M为0.33时，次生颗粒的质量占比变化情况与图4c相似，压实量从30 mm增加到40 mm时次生颗粒的质量占比增量较大，从11.46%增加到25.3%，百分比增量为13.84%。

2.2　粗岩石颗粒材料压实后的颗粒破碎度

岩石颗粒材料压实后的颗粒破碎程度通常

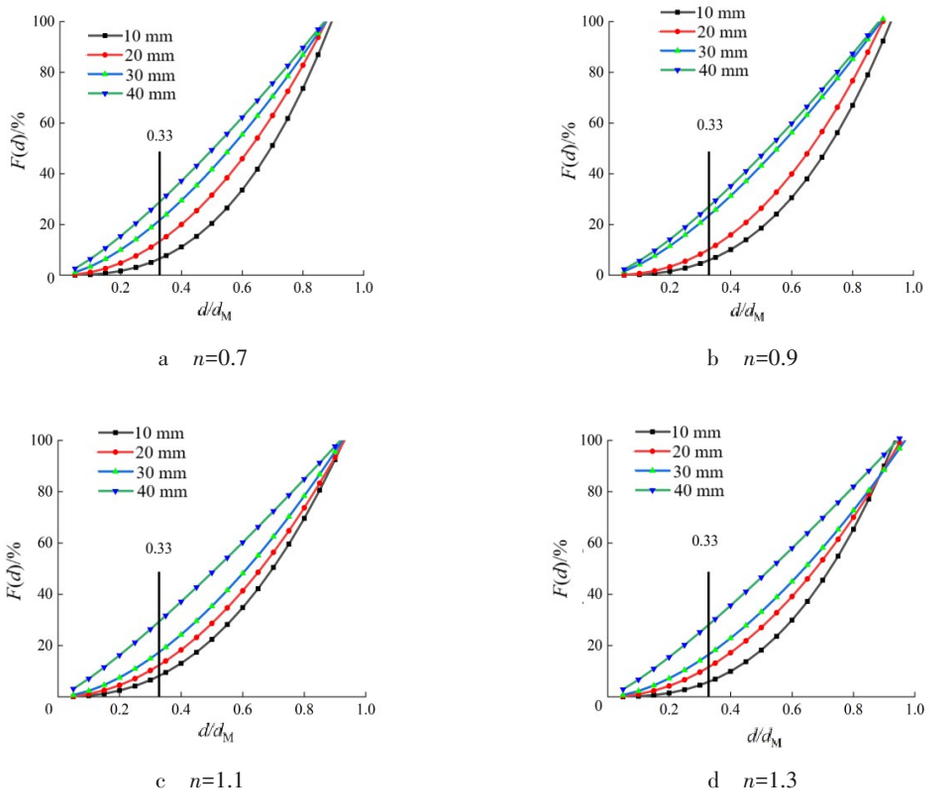


图4　不同Talbot指数下、不同压实量的次生颗粒质量分数变化情况

Fig. 4　Variation of mass fraction of secondary particles under different Talbot indices and compaction amounts

用颗粒破碎度来表示，本文采用了Marsal[5]提出的破碎度指标B_g来定量分析岩石颗粒材料的破碎程度。

$$B_g = \sum \Delta W_k \tag{2}$$

式中：B_g为颗粒破碎度；ΔW_k为压实试验前后各粒径含量的差值。

图5给出了不同Talbot指数下试样压实量与颗粒破碎度的关系。从图5可以看出，随着压实量的增加，试样的颗粒破碎度由缓慢增大逐渐变为快速增大。通过对不同Talbot指数下试样压实量与颗粒破碎度之间的关系进行拟合，发现它们之间存在指数函数关系，具体表达式如表2所示。

表2中的各表达式可以统一表述为

$$B_g = Ae^{BH} \times 100\% \tag{3}$$

式中：A和B是表达式的系数，与试样Talbot的幂指数相关。

图6为Talbot幂指数与表达式(3)的系数A和B的关系。由图6可知，试样的Talbot幂指数与系数A、B呈线性关系。

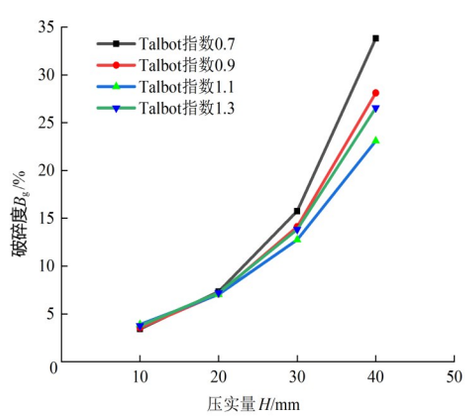


图5　不同Talbot指数下试样压实量与破碎度的关系

Fig. 5　The relationship between compaction amounts and fragmentation degree of samples under different Talbot indices

2.3　岩石颗粒材料压实破碎后的分形特征

岩石颗粒材料压实破碎后，粒径小于或等于d的颗粒质量与试样总质量的比例关系可以表示为[1]

表 2　不同 Talbot 指数下压实量与破碎度的拟合表达式

Table 2　The fitting expression of compaction amounts and fragmentation degree under different Talbot indices

Talbot 幂指数 n	B_g/%	R^2
0.7	$1.592\,1e^{0.076\,4H} \times 100$	0.952 7
0.9	$1.786\,9e^{0.068\,9H} \times 100$	0.933 4
1.1	$2.146\,3e^{0.059\,4H} \times 100$	0.982 8
1.3	$1.956\,3e^{0.065\,2H} \times 100$	0.984 1

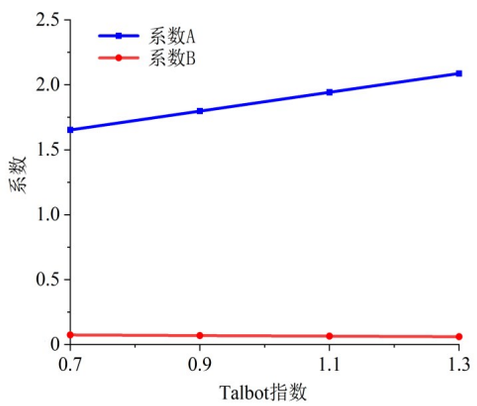


图 6　Talbot 指数与系数的关系

Fig. 6　The relationship between Talbot index and coefficient

$$F(d)=\frac{M_d(d_i\leqslant d)}{M_{\mathrm{T}}}=\frac{d_i^{3-D}-d_{\min}^{3-D}}{d_{\max}^{3-D}-d_{\min}^{3-D}} \tag{4}$$

式中：M_d 为岩石颗粒压实后粒径小于或等于 d 的颗粒质量；M_{T} 为试样的总质量；$d_{\min}$、$d_{\max}$ 分别为试样压实后颗粒的最小粒径与最大粒径；D 为分形维数。

假设试样压实后颗粒的最小粒径 $d_{\min}$ 为 0，则式(4)可表示为

$$F(d)=\frac{M_d(d_i\leqslant d)}{M_{\mathrm{T}}}=\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \tag{5}$$

对式(5)两侧同时取对数，得

$$\lg\frac{M_d}{M_{\mathrm{T}}}=(3-D)\lg\frac{d_i}{d_{\max}} \tag{6}$$

从而

$$D=3-\frac{\lg\dfrac{M_d}{M_{\mathrm{T}}}}{\lg\dfrac{d_i}{d_{\max}}} \tag{7}$$

图 7 给出了不同 Talbot 指数下、不同压实量的岩石试样压实破碎后分形维数的变化。由图 7 可以看出，在相同压实量下，各 Talbot 指数试样的

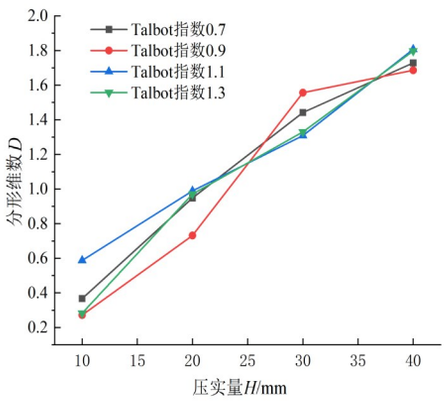


图 7　不同压实量下分形维数的变化规律

Fig. 7　Variation law of fractal dimension under different compaction amounts

分形维数集中在一定的范围内；各 Talbot 指数下分形维数 D 随着试样压实量的增加而显著增大。

2.4　岩石颗粒材料压实过程的能量耗散

试样的应变能密度可以有效反映单位体积饱和岩石颗粒材料在压实变形过程中的能量耗散，而试样的粒径分布又与其应变能密度关系密切。因而，在岩石颗粒材料粒径分布的基础上计算试样的应变能密度，即可计算岩石颗粒材料试样压实过程中耗散的能量。

单位体积试样压实过程中的总压实作功 W 可以表示为

$$W=\int_0^{\varepsilon}\sigma\mathrm{d}\varepsilon \tag{8}$$

式中：ε 为轴向应变；σ 为轴向应力。

试验过程中试验机框架和压头、压实活塞、压实装置(缸筒)和底座等可视为刚体，因而可以忽略其产生的弹性变形，从而试验中所耗散的能量主要是试验机对试样的压实变形和压实装置内壁与试样之间的摩擦力。压实装置内壁与试样之间摩擦力的单位能量耗散可表示为

$$W_{\mathrm{m}}=\frac{\displaystyle\int_0^{\varepsilon}\left(\mu\lambda\sigma 2\pi r h_0(1-\varepsilon)\right)\frac{h_0}{2}\mathrm{d}\varepsilon}{\pi r^2 h_0(1-\varepsilon)}=\frac{\lambda\mu h_0}{r}W \tag{9}$$

式中：W_{m} 为摩擦力单位能量耗散；μ 为摩擦系数；λ 为侧压系数；r 为缸筒内径；h_0 为试样初始高度。

由于试验前在缸筒内壁均匀涂抹的一层润滑油可以减少两者之间的摩擦，故压实装置内壁与试样之间的摩擦力可忽略不计。根据能量守恒定律，试样压实过程的应变能密度可以表示为

$$v_\varepsilon = W - W_m = \int_0^\varepsilon \sigma \mathrm{d}\varepsilon \tag{10}$$

图 8 给出了不同 Talbot 指数下试样压实量与应变能密度的关系。从图 8 可以看出,应变能密度随着试样压实量的增大而增大,并且增大速率越来越快。

表 3 给出了二者关系的拟合方程,显然试样的压实量与应变能密度之间存在幂函数关系。

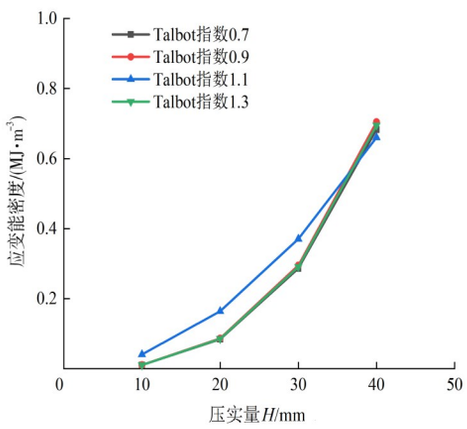


图 8　不同 Talbot 指数下试样压实量与应变能密度的关系

Fig. 8　The relationship between compaction amounts and strain energy density of samples under different Talbot indices

表 3　不同 Talbot 指数下试样压实量与应变能密度的拟合表达式

Table 3　Fitting expression of sample compaction amounts and strain energy density under different Talbot indices

Talbot 幂指数 n	应变能密度 v_ε/(MJ·m^{-3})	R^2
0.7	$1.0\times10^{-5}H^{3.0175}$	0.995 3
0.9	$1.0\times10^{-5}H^{3.0261}$	0.981 4
1.1	$4.0\times10^{-4}H^{2.0085}$	0.943 8
1.3	$1.0\times10^{-5}H^{3.0223}$	0.994 6

通过计算各个试样的颗粒破碎度和应变能密度,并对两者的关系进行拟合,发现不同 Talbot 指数下试样的颗粒破碎度与应变能密度之间存在线性关系,如表 4 所示。

图 9 给出了不同 Talbot 指数下不同压实量的颗粒破碎度与应变能密度间的关系。由图 9 可以看出,试样的应变能密度随着颗粒破碎度的增大而增大,其最大破碎度接近 30%,最大应变能密度为 0.94 MJ/m^3;另外,试样的应变能密度随 Talbot 指数的增加而增大,故 Talbot 指数越大,试样的应变能密度越大,压实过程中消耗的能量就越多。

表 4　不同 Talbot 指数下破碎度与应变能密度的拟合表达式

Table 4　Fitting expression of fragmentation degree and strain energy density under different Talbot indices

Talbot 幂指数 n	应变能密度 v_ε/(MJ/m^3)	R^2
0.7	$0.023\,4B_g - 0.084\,0$	0.984 0
0.9	$0.029\,3B_g - 0.104\,4$	0.981 5
1.1	$0.033\,4B_g - 0.106\,5$	0.997 4
1.3	$0.044\,0B_g - 0.166\,1$	0.999 6

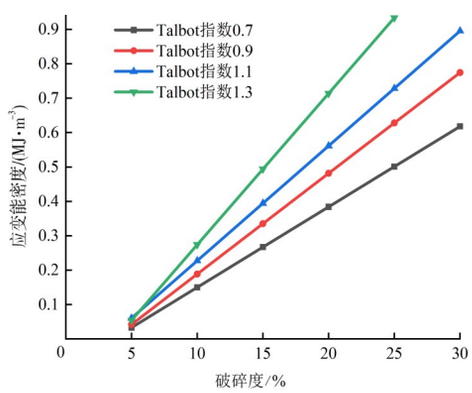


图 9　不同压实量下试样破碎度与应变能密度的关系

Fig. 9　Relationship between fragmentation degree and strain energy density of samples under different compaction amounts

3　结论

通过对不同级配和不同压实量下岩石颗粒材料的压实试验,观察对比试验前后岩石颗粒材料的形态及其粒径分布,分析颗粒压实过程中的能量耗散规律,得出主要结论如下:

1) 压实试验中,不同级配下的岩石颗粒试样压实产生的次生颗粒主要来自 10~15 mm 粒径的岩石颗粒材料。次生颗粒的质量随着材料粒径的增大而增加;在不同的压实量下,同一粒径的次生颗粒质量随着压实量的增大而增加。

2) 岩石颗粒材料试样的颗粒破碎度随着压实量的增加而增大,通过拟合曲线发现试样的压实量与颗粒破碎度之间存在着指数关系。

3) 试样的分形维数随着压实量的增加呈显著上升的趋势,各级配下试样的分形维数与压实量之间存在线性关系。

4) 采用试验后的应变能密度来反映试样的能量耗散,发现试样的应变能密度与压实量之间存在幂函数的关系,即试样的应变能密度随着压实量的增加呈现幂函数增长的规律。

5) 计算各个试样的颗粒破碎度和应变能密度,并对两者的关系进行拟合,发现试样在不同压实量下,应变能密度随着颗粒破碎度的增大而增大,它们之间呈线性关系。

参考文献:

[1] 张少均, 柳凯, 朱磊磊, 等. 冲击碾压改建路面施工对路基动力效应的试验研究[J]. 公路工程, 2021, 46(1): 154-160, 204.

[2] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 661-665.

[3] ALAEI E, MAHBOUBI A. A discrete model for simulating shear strength and deformation behaviour of rockfill material, considering the particle breakage phenomenon[J]. Granular Matter, 2012, 14(6): 707-717

[4] 郁邦永, 陈占清, 戴玉伟, 等. 饱和破碎砂岩压实过程中粒度分布及能量耗散[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 197-204.

[5] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(2): 27-43.

[6] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177-1192.

[7] EINAV I. Breakage mechanics: Part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(6): 1274-1297.

[8] 孔德志, 张其光, 张丙印, 等. 人工模拟堆石料的颗粒破碎率试验研究[J]. 中国科技论文在线, 2009, 2(4): 352-358.

[9] 刘萌成, 孟锋, 王洋洋. 粗粒料颗粒破碎变化规律大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 561-567.

[10] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B2): 1921-1926.

[11] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.

[12] SAMMIS C, KING G, BIEGEL R. The kinematics of gouge deformation[J]. Pure and Applied Geophysics, 1987, 125(5): 777-812.

[13] KING G C P, SAMMIS C G. The mechanisms of finite brittle strain[J]. Pure and Applied Geophysics, 1992, 138(4): 611-640.

[14] LI Y, HUANG C M, WANG B L, et al. A unified expression for grain size distribution of soils[J]. Geoderma, 2017, 288: 105-119.

[15] 彭小东, 马磊, 李满意, 等. 不同击实能量下粗粒土颗粒分形特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(8): 137-141.

[16] 刘石, 许金余, 白二雷, 等. 基于分形理论的岩石冲击破坏研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 163-166.

[17] 许金余, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3225-3229.

[18] GAO M Z, ZHANG J G, LI S W, et al. Calculating changes in fractal dimension of surface cracks to quantify how the dynamic loading rate affects rock failure in deep mining[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 3013-3024

[19] 华安增. 地下工程周围岩体能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1054-1059.

[20] 尤明庆, 华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 778-781.

[21] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.

[22] 张亮, 王桂林, 雷瑞德, 等. 单轴压缩下不同长度单裂隙岩体能量损伤演化机制[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 24-34.

[23] 郁邦永, 陈占清, 吴疆宇, 等. 饱和级配破碎泥岩压实与粒度分布分形特征试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1887-1894.

Research on Particle Size Distribution and Energy Dissipation During the Compaction Process of Rock Granular Materials

MIAO Xinyu[1], XU Zhengwei[2], KONG Hailing[1], ZUO Chengzhen[1]

(1. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China;
2. Hubei Zhentai Construction Engineering Quality Testing Co. Ltd., Wuhan Institute of Earthquake Engineering Co. Ltd., Wuhan Hubei 430071, China.)

Abstract: In order to explore the particle size distribution and energy dissipation of rock granular materials in the process of compaction, the graded rock granular materials were taken as the research object, and the self-made compaction test system was used to carry out lateral limited compaction crushing tests on rock granular materials with different compaction amounts. The results show that the fragmentation degree, fractal dimension and energy dissipation of samples with different proportions increase gradually with the increase of compaction amounts. By fitting and analyzing the fragmentation degree and energy dissipation of samples, it is found that there is a significant linear relationship between them, which further proves that the compaction amounts of samples is the main influencing factor of fragmentation degree, fractal dimension and energy dissipation index.

Keywords: rock granular materials; particle size distribution; fragmentation degree; fractal characteristics; strain energy density

(责任编辑:李华云)

(上接第21页)

[6] 吴任博, 刘淑琴. 基于一致性算法的新型电力系统边缘集群分布式经济调度模型[J]. 可再生能源, 2024, 42(4): 553-560.

[7] LI Y F, WANG X, SUN J, et al. Data-driven consensus control of fully distributed event-triggered multi-agent systems [J]. Science China Information Sciences, 2023, 66(5): 152202.

[8] HE X, HO D W C, HUANG T W, et al. Second-order continuous-time algorithms for economic power dispatch in smart grids[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 48(9): 1482-1492.

[9] 白云霄, 钱峰, 刘俊磊, 等. 一种与初始态无关的分布式电力调度算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 30-35.

Distributed Economic Dispatch of Microgrids with Finite-time Event Triggering Under Variable Topology Structures

WANG Hongzhi, LI Huiyuan, XIA Shulan, XU Tao, GENG Wei

(College of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

Abstract: A distributed finite-time consensus algorithm based on event triggering is proposed for the economic dispatch problem under switching topology structures. The algorithm is based only on partial generator information. Under the constraints of microgrid supply-demand balance and generator output power, it constrains the generator output power through auxiliary variables to minimize the total generation cost. Finally, the simulation verification of the microgrid system model built on the MATLAB platform shows that the designed control protocol not only effectively reduces the system communication burden, but also achieves the economic dispatch of the microgrid with faster convergence speed and better anti-interference performance.

Keywords: economic dispatch; event triggering; finite-time consensus; distributed control

(责任编辑:邵 茗)